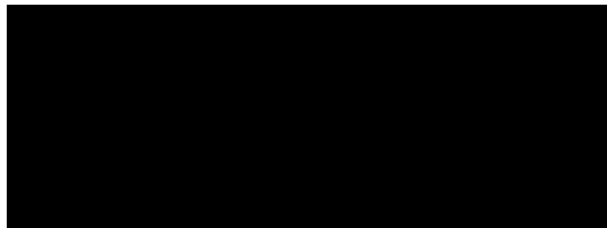


Physiklabor für Anfänger*innen
Sommersemester 2025

Versuch 31: Kalorimeter

Durchgeführt am 30.9.2025



2. Oktober 2025



Inhaltsverzeichnis

1	Ziel des Versuchs	1
2	Aufbau	1
3	Durchführung	1
3.1	Wärmekapazität Kalorimeter	1
3.2	Spezifische Wärmekapazität Aluminium	2
3.3	Spezifische Wärmekapazität Messing	2
4	Auswertung und Fehleranalyse	2
4.1	Wärmekapazität Kalorimeter	3
4.2	Spezifische Wärmekapazität Aluminium	5
4.3	Spezifische Wärmekapazität Messing	7
5	Diskussion	8
5.1	Wärmekapazität Kalorimeter	8
5.2	Spezifische Wärmekapazität Aluminium und Messing	9
5.3	Bestimmung der Temperatur-Unsicherheiten über Konfidenzbänder	9
5.4	Verbesserungsvorschläge und Diskussion der Messmethoden	9
6	Erklärung zur Autorenschaft	10
7	Tabellensammlung	11
8	Laborbucheintrag	12



1 Ziel des Versuchs

Ziel des Versuchs ist die Bestimmung der spezifischen Kapazität von Aluminium und Messing mit einem Kalorimeter. Dafür wird beim Vermischen von Wasser verschiedener Temperaturen der Temperaturverlauf betrachtet und damit die Wärmekapazität des Kalorimeters ermittelt. Danach werden erhitzte Metalle in kälteres Wasser im Kalorimeter gelegt und die Temperaturentwicklung über längere Zeit untersucht.

2 Aufbau

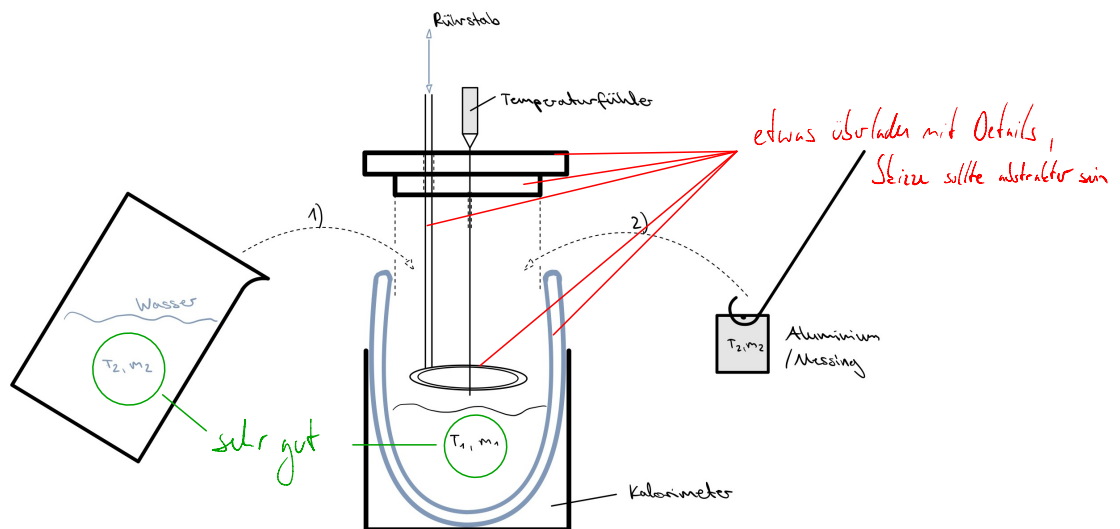


Abbildung 1: Skizze des Aufbaus mit Messgrößen

Die in Abb. 1 mit 1) und 2) markierten Pfeile stellen die beiden Versuchsteile dar, welche separat durchgeführt werden. Im Kalorimeter befindet sich in beiden Teilen als Ausgangssituation eine bestimmte Menge Wasser der Temperatur T_1 und der Masse m_1 . Im Deckel des Kalorimeters befinden sich zwei Löcher für eine Rührvorrichtung und einen Temperaturfühler, die damit bei geschlossenem Deckel ins Wasser gehalten werden können. Die Temperatur T wird an einem Multimeter abgelesen, welches mit dem Temperaturfühler verbunden ist und die Zeit wurde mit einer Stoppuhr per Hand genommen. Die Stoppuhr und die Temperaturanzeige werden zusätzlich gefilmt, um die Messwerte im Nachhinein genauer bestimmen zu können.

3 Durchführung

3.1 Wärmekapazität Kalorimeter

Im ersten Teil mischen wir warmes und kaltes Wasser im Kalorimeter. Zu Beginn erhitzen wir dazu etwas Wasser. Anschließend messen wir die Temperatur und das Gewicht von jeweils dem

✓ kalten und dem warmen Wasser. Nun füllen wir das warme Wasser in das Kalorimeter und starten die Messung der Temperatur, bei laufender Stoppuhr. Nach ein paar Minuten geben wir das kalte Wasser dazu, vermengen die Mischung mit der gegebenen Vorrichtung und warten wieder einige Minuten.

3.2 Spezifische Wärmekapazität Aluminium ^{Messing}

✓ Nun beginnen wir mit kaltem Wasser im Kalorimeter. Wir messen auch hier Gewicht und Temperatur, bevor wir nach ein paar Minuten ein erhitztes Aluminiumgewicht, dessen Masse und Temperatur zuvor bestimmt wurden, dem Wasser im Kalorimeter hinzufügen. Anschließend warten wir, bis sich die Temperatur nicht mehr ändert.

3.3 Spezifische Wärmekapazität Messing

Zuletzt gehen wir genau wie im zweiten Versuchsteil vor, mit dem einzigen Unterschied, dass wir statt eines Aluminiumgewichts ein Gewicht aus Messing verwenden.

4 Auswertung und Fehleranalyse

Für die zu bestimmenden Messgrößen werden zu Beginn Unsicherheiten geschätzt. Für die Temperaturmessung mit dem Multimeter mit einer digitalen Anzeige, die ganze Grad-Zahlen anzeigte, gehen wir von einer rechtecksverteilten Unsicherheit der Breite $2a = 1^\circ\text{C}$ aus und erhalten damit:

✓
$$\Delta T = \frac{0,5^\circ\text{C}}{\sqrt{3}} = \underline{0,29^\circ\text{C}}$$
 Runden! Spacing bei Zahlen mit Komma falsch!

✓ Für die Digitalwaage gehen wir ebenfalls von einer rechtecksverteilten Unsicherheit mit Breite $2a = 1\text{ g}$ aus. Zusätzlich dazu fiel auf, dass die gleiche Menge Wasser bei wiederholtem Wiegen um bis zu 3 g variierte, weshalb wir zusätzlich von einer normalverteilten Unsicherheit mit $s_m = 3\text{ g}$ aus. Mit quadratischer Addition erhalten wir endgültig für die Unsicherheit der Masse:

$$\Delta m = \sqrt{\left(\frac{0,5\text{ g}}{\sqrt{3}}\right)^2 + (3\text{ g})^2} = \underline{3,01\text{ g}}$$
 Runden!

(Wenn wir nur signifikante Stellen betrachten, nutzen wir zukünftig $\Delta m = 3\text{ g}$.)

✓ Zuletzt wird die Zeitmessung betrachtet. Wir haben im Versuchsverlauf die Stoppuhr zusammen mit dem Thermometer per Video aufgenommen. Danach wurde die Aufnahme analysiert und die Temperaturen in bestimmten Zeit-Schritten notiert. Wie in Abb. 10 zu erkennen, wurde in den relevanteren Abschnitten mit kleineren Zeitschritten gearbeitet. Da bei der Untersuchung des Videos die einzelnen Frames nicht genau mit der gemessenen Sekundenzahl übereinstimmten, gehen wir für die gemessene Zeit von einer normalverteilten Unsicherheit mit der Standardabweichung $s_t = 1\text{ s}$ aus. Damit ist

$$\Delta t = 1\text{ s}$$
 erstaunlich groß

Das ist nicht ausreichend begründet

Vielleicht in Diskussion schreiben

Die folgenden Berechnungen werden unter der Annahme getätigt, dass die gesamte Wärmemenge erhalten bleibt, also die vom warmen Medium abgegebene Wärme jener gleicht, die vom kälteren und dem Kalorimeter aufgenommen wird.

$$Q_{\text{abgegeben}} = Q_{\text{aufgenommen}} \quad (1)$$

Aus diesem Zusammenhang lässt sich Gleichung (2) herleiten.

✓

$$\Gamma_K = m_k \left(\frac{T_m - T_k}{T_w - T_m} \right) c_k - m_w c_w \quad (2) \text{ Referenz Deutlicher}$$

mit kaltem w...

Hier stehen die Größen c_w für spezifische Eigenschaften des warmen, c_k für die des kalten Stoffes und T_m für die Temperatur nach dem Vermischen. Γ_K beschreibt die Wärmekapazität des Kalorimeters.

4.1 Wärmekapazität Kalorimeter

Die aufgenommenen Messwerte für Zeit t und Temperaturen T_i (s. Abb. 10) werden in Abb. 2 dargestellt. Dabei werden mit Formeln für die lineare Regression aus [1], ^{Kapitel} Ausgleichsgeraden mit Konfidenzbändern gezogen. Hierbei wird in drei Intervalle unterteilt: vor, während und nach dem Vermischen. Beim Vermischen entsteht in der Temperaturmessung ein kurzzeitiger Ausschlag nach unten, der für die lineare Regression von T_m (blau) nicht berücksichtigt wird, da dieser nicht die Mischtemperatur darstellt, sondern durch eine kalte Strömung an dem Ort des Temperaturfühlers verursacht wurde. Sicher? Argumentation aber: Wert passt nicht zur Erwartung, Ursache vermutlich schlechte Durchmischung => Wert wird nicht berücksichtigt

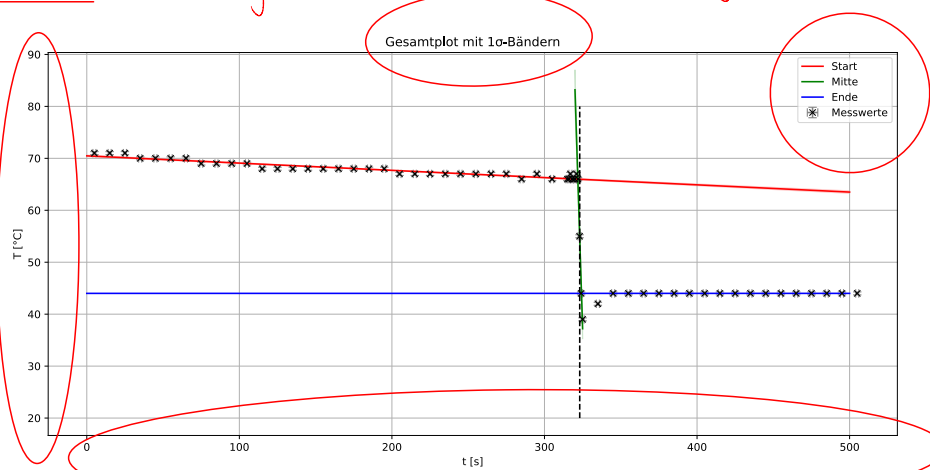
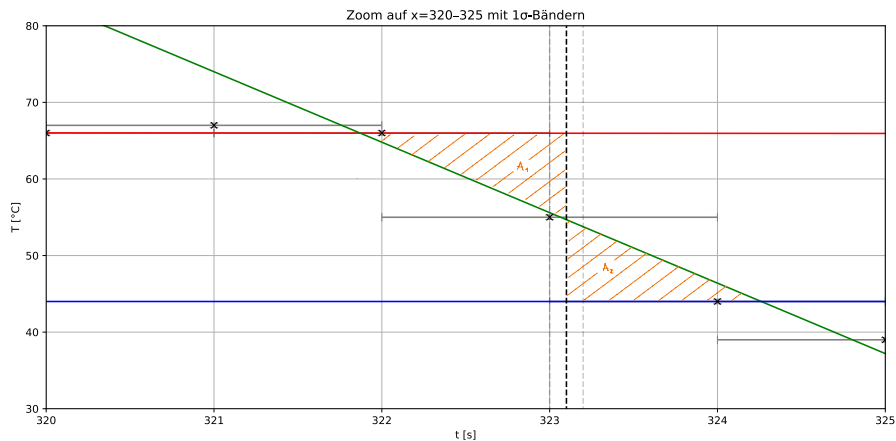


Abbildung 2: Temperaturverlauf im Kalorimeter

Zur besseren Betrachtung wird in Abb. 3 das Zeitintervall zwischen 320 s und 325 s vergrößert, in das der Mischvorgang fällt.

Warum ist das notwendig? } Dabei fällt auf, dass die rote Ausgleichsgerade für T_k in entstandenem Seitenverhältnis, also auch in Relation zur grünen Ausgleichsgeraden ebenfalls beinahe waagerecht verläuft. Der Zeitpunkt t_0 , der durch die gestrichelte, vertikale Linie gekennzeichnet ist, wurde so abgeschätzt, dass die eingezeichneten Flächen A_1 und A_2 gleich groß werden. Nun werden die Werte der roten und der

✓



Schriftgröße
zu klein!

Abbildung 3: Genauere Darstellung des Temperaturverlaufs unmittelbar um das Vermengen

blauen Geraden bis t_0 extrapoliert, um die Temperaturen T_w (rot) und T_m (blau) zu erhalten. Es ergeben sich die Werte:

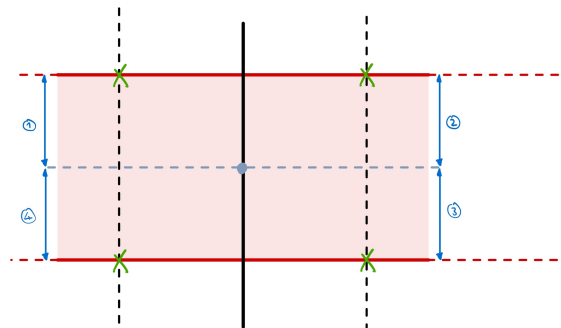
$$\hat{T}_w = 65,97^\circ\text{C} \quad \text{und} \quad \hat{T}_m = 44,00^\circ\text{C} \quad \text{ff Runden}$$

Damit fehlen für das Rechnen mit Gleichung (2) noch die notierten Werte für die Massen der beiden Wassermengen $m_w = 100\text{ g}$ und $m_k = 81\text{ g}$ und die Temperatur des kalten Wassers $T_k = 15^\circ\text{C}$. Als spezifische Wärmekapazitäten $c_{w/k}$ des Wassers dient der Literaturwert $c_W = 4183 \frac{\text{J}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$ aus [2]. Für den Fehler der Wärmekapazität ergibt sich mittels Gauß'scher Fehlerfortpflanzung Gleichung (3).

$$\Delta\Gamma_K = \sqrt{\left(\frac{T_m - T_k}{T_w - T_m} c_k \Delta m_k\right)^2 + (c_w \Delta m_w)^2 + \left(c_k m_k \frac{T_m - T_k}{(T_w - T_m)^2} \Delta T_m\right)^2} \quad \text{entweder} \quad \sqrt{(\dots)^2 + \dots} + (\dots)^2 + \dots \quad (3)$$

$$+ \left(\frac{-m_k c_k}{T_w - T_m} \Delta T_k\right)^2 + \left(\frac{-m_k (T_m - T_k)}{(T_w - T_m)^2} \Delta T_w\right)^2 \quad \text{oder} \quad \Delta\Gamma_K = (\dots)^2 + \dots + (\dots)^2 + \dots$$

Um die hierfür benötigten Unsicherheiten ΔT_w und ΔT_m zu ermitteln entschieden wir uns für ein Verfahren, das in Abb. 4 illustriert wird:



Tipp: Konfidenzband
nicht als Gerade
einzeichnen

Abbildung 4: Skizze zur Berechnung von ΔT . Rote Linie entspricht Konfidenzband des Fits, Schwarze Linie entspricht geschätztem t_0 und die gestrichelten schwarzen Linien der geschätzten Unsicherheit Δt_0

Fachbegriff
„arithmetisches Mittel“
rechnet

Um nun die Unsicherheiten für die Temperaturen zu bestimmen, addieren wir die skizzierten Abstände 1,2,3,4 und dividieren anschließend durch 4. So fließt in unsere Fehler ΔT_w und ΔT_m ebenfalls der Fehler für t_0 ein und über das vierteln werden diese gemittelt.

Dieses Vorgehen verwenden wir auch in Abschnitt 4.2 und Abschnitt 4.3.

In diesem Versuchsteil ergeben sich aus diesem Vorgehen die Unsicherheiten:

$$\begin{aligned}\Delta T_w &= 0,09^\circ\text{C} \\ \Delta T_m &= 0,00^\circ\text{C}\end{aligned}$$

Vorrechnung mit Typ B Unsicherheit ΔT fehlt noch!

Für T_k verwenden wir den Messwert 15°C mit einer in Abschnitt 4 erklärten Messunsicherheit von $\Delta T = 0,29^\circ\text{C}$.

Mit Gleichung (2) und Gleichung (3) ergibt sich für die Wärmekapazität des Kalorimeters der endgültigen Wert von:

$$\Gamma_K = (28,9 \pm 21,4) \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

4.2 Spezifische Wärmekapazität Aluminium

Um die spezifische Wärmekapazität von Aluminium zu bestimmen, gehen wir analog zum ersten Versuchsteil vor. Hierbei gießen wir zunächst kaltes Wasser in das Kalorimeter und geben anschließend den erhitzten Aluminium-Zylinder hinzu. Um daraus die spezifische Wärmekapazität zu errechnen verwenden wir die Formel:

$$c_w = \frac{(m_k c_k + \Gamma_K) \cdot (T_m - T_k)}{m_w \cdot (T_w - T_m)} \quad (4)$$

Diese ergibt sich aus dem Zusammenhang in Gleichung (1). Um die Unsicherheit hiervon zu bestimmen, verwenden wir die Gauß'sche Fehlerfortpflanzung. Aus dieser folgt:

$$\Delta c_w = \sqrt{\left(\left(\frac{T_m - T_k}{(T_w - T_m) m_w} \Delta \Gamma_K \right)^2 + \left(\frac{c_k m_k + \Gamma_K}{(T_w - T_m) m_w} \Delta T_k \right)^2 + \left(\frac{(T_w - T_k)(c_k m_k + \Gamma_K)}{m_w (T_w - T_m)^2} \Delta T_m \right)^2 + \left(\frac{(T_m - T_k)(c_k m_k + \Gamma_K)}{m_w (T_w - T_m)^2} \Delta T_w \right)^2 + \left(\frac{(T_m - T_k) c_k}{(T_w - T_m) m_w} \Delta m_k \right)^2 + \left(\frac{(T_m - T_k)(c_k m_k + \Gamma_K)}{(T_w - T_m) m_w^2} \Delta m_w \right)^2} \quad (5)$$

Hierbei bezeichnet

- c_w die spezifische Wärmekapazität des Aluminiums,
- T_w die Temperatur des Aluminiums,
- m_w die Masse des Aluminiums,
- c_k der spezifischen Wärmekapazität des Wassers
- T_k die Temperatur des kalten Wassers,

Warum Stichpunkte?

- m_k die Masse des kalten Wassers,
- T_m die Mischtemperatur.

Die Temperaturen T_k und T_m werden dabei durch grafische Auswertung bestimmt. Auch deren Unsicherheiten werden, wie in Abschnitt 4.1 erklärt, ermittelt. Hierfür werden folgende Plots angefertigt:

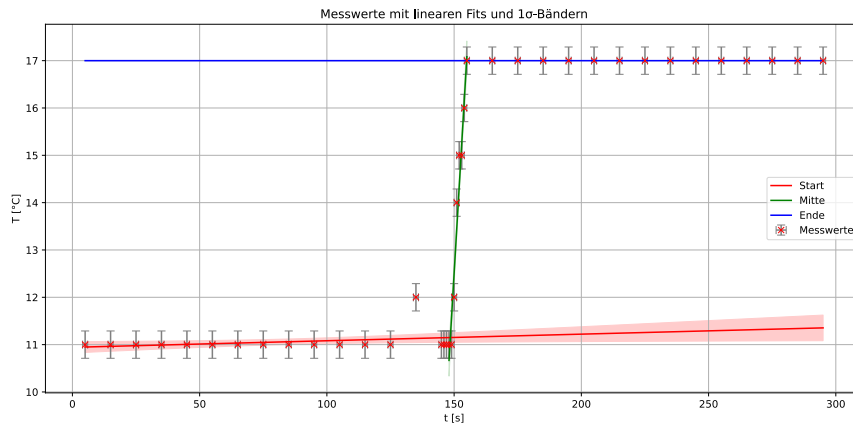


Abbildung 5: Zweite Messung mit Messwerten, Ausgleichsgeraden und Konfidenzbändern

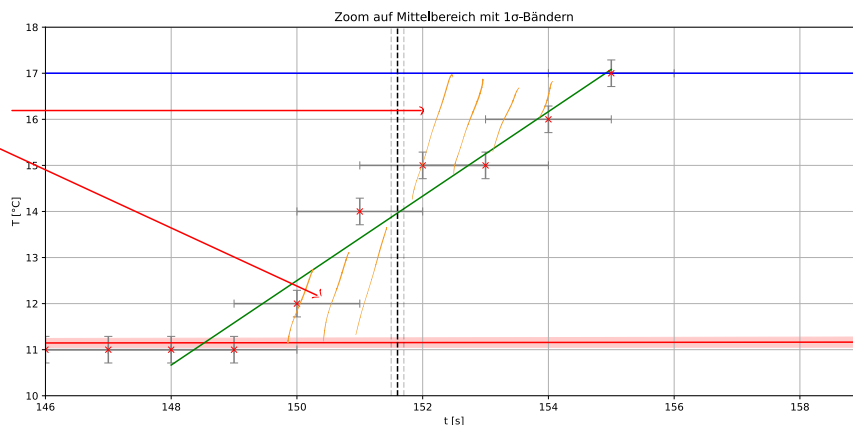


Abbildung 6: Zweite Messung gezoomt mit Messwerten, Ausgleichsgeraden und Konfidenzbändern und Vertikaler Geraden, die die Dreiecksflächen gleich groß macht

Um die Werte für T_m , T_k , und deren Unsicherheiten zu bestimmen, lesen wir den Zeitpunkt t_0 ab und schätzen dessen Unsicherheit Δt_0 . Wir ermitteln mithilfe von Abb. 6 für $t_0 = 151,6$ s und schätzen $\Delta t_0 = 0,1$ s. Hiermit ermitteln wir, mit selbem Vorgehen wie in Abschnitt 4.1:

$$T_k = (11,15 \pm 0,11)^\circ\text{C}$$

$$T_m = 17,00^\circ\text{C} \quad \text{mit} \quad \Delta T_m = 0,00^\circ\text{C}$$

Um die Berechnung der spezifischen Wärmekapazität und der dazu gehörigen Fehlerrechnung, benötigen wir noch weitere Messwerte und deren Unsicherheiten. Für die Messunsicherheit ver-

wenden wir die zu Beginn der Auswertung angegebenen Werte. Daraus folgt:

$$T_w = (75,00 \pm 0,29) ^\circ\text{C}$$

$$m_w = (71 \pm 3) \text{ g}$$

$$c_k = 4183 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

$$m_k = (127 \pm 3) \text{ g}$$

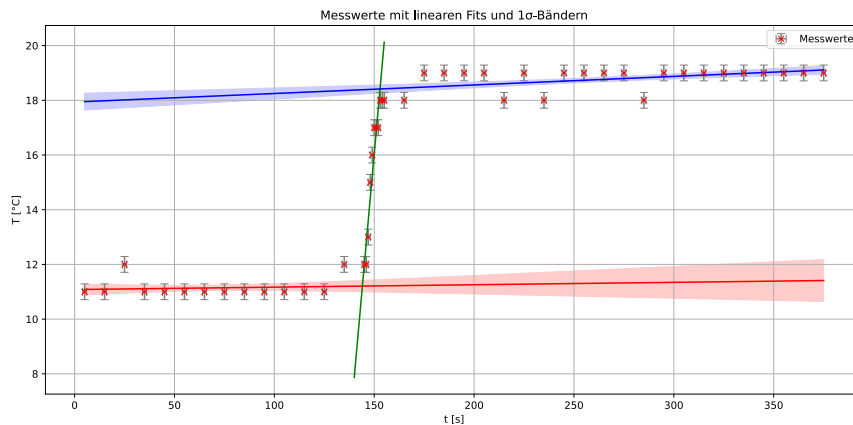
Hiermit errechnet man für die spezifische Wärmekapazität von Aluminium:

$$c_{\text{Aluminium}} = (796 \pm 51) \frac{\text{J}}{\text{K}}$$

4.3 Spezifische Wärmekapazität Messing

Um die spezifische Wärmekapazität von Messing zu bestimmen, gehen wir genauso wie im vorherigen Versuchsteil vor. Wir verwenden also ebenfalls Gleichung (4) und für die Fehlerrechnung Gleichung (5). Alle Größen des Aluminiumstücks werden allerdings durch die des Messingstücks ersetzt. Aus unseren Messwerten lässt sich Abb. 7 erstellen.

Für die genauere Auswertung des Mischprozesses dient wieder die vergrößerte Ansicht Abb. 8.



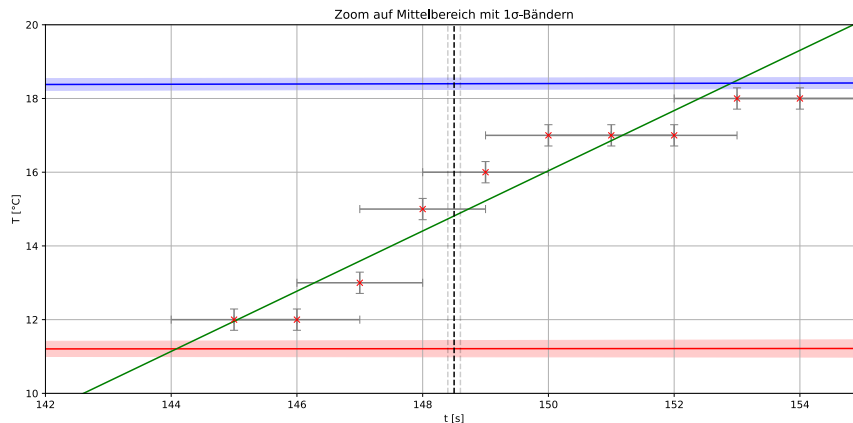
Schriftgröße
zu klein!

Abbildung 7: Messwerte für den dritten Versuchsteil

Auf die gleiche Weise wie in Abschnitt 4.2 werden die benötigten Werte bestimmt. t_0 schätzen wir auf 148,5 s und $\Delta t_0 = 0,1$ s. Daraus folgen

$$T_k = (11,21 \pm 0,22) ^\circ\text{C}$$

$$T_m = (18,4 \pm 0,15) ^\circ\text{C}$$



Schriftgröße
zu klein!

Abbildung 8: Genauere Ansicht des dritten Versuchsteils

Die restlichen Werte wurden, wie in Abschnitt 4.2, bereits vor dem Mischen gemessen. Deren Fehler können aus Abschnitt 4 übernommen werden.

$$T_w = (93,00 \pm 0,29) ^\circ\text{C}$$

$$m_w = (213 \pm 3) \text{ g}$$

$$c_k = 4183 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

$$m_k = (170 \pm 3) \text{ g}$$

braucht viel Platz

Nun können wir diese zusammen mit der in Abschnitt 4.1 bestimmten Wärmekapazität in Gleichung (4) einsetzen und erhalten für die spezifische Wärmekapazität von Messing:

$$c_{\text{Messing}} = (335 \pm 18) \frac{\text{J}}{\text{K}}$$

5 Diskussion

5.1 Wärmekapazität Kalorimeter

Beim Aufnehmen der Messungen fiel vor ^{an} Allem auf, dass die Temperatur des heißen Wassers T_1 deutlich schneller sank, als die des Wassers mit der Temperatur T_m , die über mehrere Minuten konstant blieb. Dennoch ist auch bei T_1 ein relativ geringer Temperaturverlust wahrzunehmen. Diese Beobachtungen sprechen für eine gute Isolation des Kalorimeters gegen die Umgebungstemperatur. Dieser Umstand führt zu einem geringen Fehler für die Ausgleichsgeraden und damit zu schmalen Konfidenzbändern für die linearen Regressionen. Das verringert den Fehler in der Extrapolation der Temperaturen T_w und T_m . Da jedoch für das Abschätzen von t_0 nach Augenmaß vorgegangen wurde, wirkt sich die dafür erwartete, größere Unsicherheit t_0 bei gegebenem Vorgehen (s. Abb. 4) ebenfalls auf die Extrapolation aus. Der so errechnete Fehler ΔT_w war für die Fehlerfortpflanzung von großer Relevanz. Neben diesem wirkte sich jedoch unsere geschätzte Unsicherheit Δm für

die Bestimmung des Gewichts der Wassermengen mit der Digitalwaage stark auf die endgültige Unsicherheit aus. Hierbei sind wir von einer deutlich höheren Unsicherheit ausgegangen, als nur derjenigen durch die Ableseunsicherheiten, da mehrmaliges Messen derselben Massen um bis zu 3 g verschiedene Werte ergeben hat. Letztere Fehlerschätzung halten wir für die Ursache für unsere ~~enorme~~ relative Unsicherheit von $\frac{\Delta\Gamma_K}{\Gamma_K} \approx 74\%$.

Hier fehlen mir Zahlen wie z.B. Größenordnungen von Beiträgen zu $\Delta\Gamma$

5.2 Spezifische Wärmekapazität Aluminium und Messing

Einheit?

Für die spezifische Wärmekapazität des Aluminiums wurde ein Wert von 796 ± 51 bestimmt. Um nun zu überprüfen, ob dieser Messwert mit dem Literaturwert aus [2] von $c_{\text{Alu}} = 888 \frac{\text{J}}{\text{K}}$, führen wir einen Signifikanztest mit einem Signifikanzniveau von 5% durch. Dieser liefert einen z-Wert von $z = 1,8$. Unser Messwert für c_{Alu} ist also verträglich mit dem erwarteten Literaturwert.

Für unser Ergebnis bei Messing führen wir selbigen Test ebenfalls durch. Dieser liefert einen z-Wert von $z = 2,3$ und damit fällt unser Ergebnis bei einem Signifikanzniveau von 5% knapp durch. Die möglichen Ursachen für diese signifikante Abweichung werden im letztem Abschnitt diskutiert.

5.3 Bestimmung der Temperatur-Unsicherheiten über Konfidenzbänder

Ein essentieller Punkt der Fehlerauswertung war das bestimmen der Unsicherheiten der Temperaturen, hierbei entschieden wir uns für die in Abschnitt 4.1 erklärte Methode. Hierbei wären auch andere Möglichkeiten zur Verfügung gestanden. Beispielweise die Berechnung über Gauß'sche Fehlerfortpflanzung mit dem Konfidenzband. Diese wäre allerdings deutlich aufwendiger und komplizierter gewesen. Da sich unsere Unsicherheiten aber sowieso im relativ kleinen Größenordnungen befinden, entschieden wir uns schlussendlich für die von uns verwendete Methode.

5.4 Verbesserungsvorschläge und Diskussion der Messmethoden

Eine Herausforderung bei dem Versuch und der daraus resultierenden erschwerten Analyse der Messergebnisse, war die ungenaue Angabe der Temperatur, vor allem während des Mischvorgangs. Da sich in diesem Prozess die Temperaturen schlagartig änderten, das Thermometer aber nur deutlich verzögert neue Werte angibt, konnten während dieses entscheidenden Prozesses, vor allem in Abschnitt 4.1, nur sehr wenige Messdaten aufgenommen werden. Dies schränkt das Auswerten über lineare Regression stark ein und verfälscht diese schnell sehr stark. Um diese Unsicherheit zu minimieren und das Auswerten eindeutiger zu machen, wäre es sinnvoll ein Thermometer zu verwenden, dass schneller auf Temperaturänderungen reagiert. Auch ein Messgerät, dass die Daten speichern kann, wäre sinnvoll.

Da für die unmittelbar aufeinanderfolgenden Temperaturmessungen von heißem und kaltem Probekörper nur ein einziges Thermometer verwendet wurde, können Messungenauigkeiten auftreten. Das Thermometer könnte nach der Messung des heißen Körpers noch nicht vollständig auf die Umgebungstemperatur zurückgekehrt sein, bevor die nächste Messung durchgeführt wurde. Um

diesen systematischen Fehler zu vermeiden, wäre es sinnvoll, zwei getrennte Thermometer zu verwenden - eines für die heißen und eines für die kalten Proben.

✓ Eine weitere Fehlerquelle, die uns bereits bei der Versuchsdurchführung auffiel, war, dass für das Mischen der Komponenten das Kalorimeter geöffnet werden musste. Bei dem Mischprozess war also zwangsläufig das Kalorimeter noch leicht geöffnet. Es kam also nicht nur zum Wärmeaustausch zwischen den beiden Komponenten, sondern auch mit der Luft im Raum.

✓ Für unsere Fehlerrechnung stellte sich auch die verwendete Waage als problematisch heraus, da ihre Ungenauigkeit maßgeblich für den großen, errechneten Fehler der Wärmekapazität Γ_K verantwortlich war. Hierbei hätte man als Verbesserung jedoch eine Messreihe mit konstantem Gewicht m aufnehmen können, um die Standardunsicherheiten der Messung mit der Waage verkleinern zu können.

6 Erklärung zur Autorenschaft

✓ Alle Autoren haben zu allen Inhalten des Protokolls zu gleichen Teilen beigetragen.

Diskutiert zielgerichtet! Wie spiegeln sich eure Beobachtungen in den Ergebnissen eurer Messungen wieder?

Trunk statistische und systematische Fehlerquellen.

Wie wirken sich die sys. Fehler auf euer Ergebnis aus? Könnte man damit erklären, dass c_{Alu} , $c_{Messing}$ (teilweise signifikant) unterschätzt wurden?

Bewertung

Formales und Aufbau: 1,3

- +++ Struktur übersichtlich
- +++ Erläuterungen zum Aufbau hilfreich
- + Vorwortschl
- Skizze darf nicht abstrakter sein, je einfacher desto verständlicher
- Spacing bei Dezimalzahlen inkorrekt
- Stichpunkte anstatt Fließtext in Kapitel 4.2

Auswertung: 1,3

- +++ Definition der Messgrößen klar
- ++ Durchführung kurz und präzise
- +++ Diagramme sehr gut
- +++ Formeln korrekt
- Flächen A_1 , A_2 fehlen teilweise
- Beschriftung d. Diagramme zu klein

Fehlerrechnung: 1,5

- +++ Abschätzung Typ B Fehler sinnvoll
- +++ Gauß'sche Fehlerfortpflanzung korrekt
- +++ Berücksichtigung Unsicherheit in t_0
- Kombination von Typ A und Typ B Fehlern fehlt
- Runden von Ergebnissen und Fehlern auf eine bzw. zwei signifikante Stellen selten falsch

Diskussion 2,0

- + Angabe Ergebnisse
- +++ z-Werte für Vgl. mit Literatur
- +++ Verbesserungsvorschläge
- Argumentation häufig weder qualitativ noch quantitativ belegt
- Verknüpfung von Fehlerquelle und Auswirkung auf Ergebnis fehlt